

# ESTUDIO AERODINÁMICO DEL EFECTO DE UN FLAP GURNEY EN UNA PALA DE AEROGENERADOR EN POSICIONES FIJAS

F. Bacchi y A. Scarabino

Grupo Fluidodinámica Computacional – GFC  
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata  
116 s/n entre 47 y 48 - (1900) La Plata - Argentina.  
Email: fbacchi@ing.unlp.edu.ar

## RESUMEN

*El trabajo presenta los resultados de simulaciones numéricas mediante un programa de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) del flujo en torno a una pala de generador eólico de 1.5 kW en distintas posiciones estáticas: bandera, arranque y peor condición de carga, para configuraciones de pala con y sin un dispositivo hipersustentador conocido como flap Gurney, reproduciendo ensayos realizados en túnel de viento.*

**Palabras clave:** generador eólico, hipersustentadores, flap Gurney

## INTRODUCCIÓN

La performance de perfiles operando en bajos números de Reynolds ha sido un tópico de interés creciente en las últimas décadas, interés que se magnifica en el caso de turbinas eólicas de baja potencia, para uso domiciliario.

Un flap Gurney consiste en una banda de pequeña altura ubicada en la zona del borde de fuga sobre el intradós de un perfil. Su altura es típicamente entre el 1% y el 4% de la cuerda [1]. Esta configuración brinda un incremento apreciable del máximo coeficiente de sustentación, aunque produciendo un pequeño cambio en el ángulo de pérdida [2,3]. Estos dispositivos generan una estela asimétrica y fluctuante, que ha sido estudiada exhaustivamente en el Grupo Fluidodinámica Computacional y el Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UNLP [4-6]. Otros investigadores han estudiado su aplicación en aviones y rotores de helicópteros y se han llevado a cabo algunos estudios experimentales sobre turbinas eólicas [7, 8].

Para una turbina eólica de eje horizontal y paso fijo, la posición de arranque de las palas es a un ángulo de ataque muy alto y muy baja eficiencia, con flujo desprendido sobre prácticamente toda la envergadura, lo que causa fuerzas importantes tanto estáticas como dinámicas, a través de desprendimientos periódicos de vórtices [6,9], afectando la vida de servicio de la turbina. Simultáneamente se debe generar suficiente torque para comenzar la rotación y con ello incrementar la eficiencia aerodinámica, al acercarse a la velocidad óptima de rotación. Los miniflaps Gurney mejoran la performance de los perfiles a altos ángulos de ataque y es esperable que incrementen el torque inicial en el rotor, reduciendo en consecuencia la velocidad del viento de arranque e incrementando la producción total de energía. Con esta motivación se encaró el presente trabajo. Se presenta una descripción del análisis numérico y resultados para una pala de un generador de 1.5 kW de potencia nominal, con un flap Gurney de altura aproximadamente igual al 2% de cuerda, ubicado sobre el borde de fuga de la pala.

## METODOLOGÍA

Para el análisis de problemas en Mecánica de Fluidos Computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics), se discretiza la región de estudio de interés del problema físico (dominio) en volúmenes más pequeños de distintas formas y tamaños, en los cuales se resuelven las ecuaciones fundamentales de conservación de masa, cantidad de movimiento, energía, etc., mediante el uso de métodos numéricos [10].

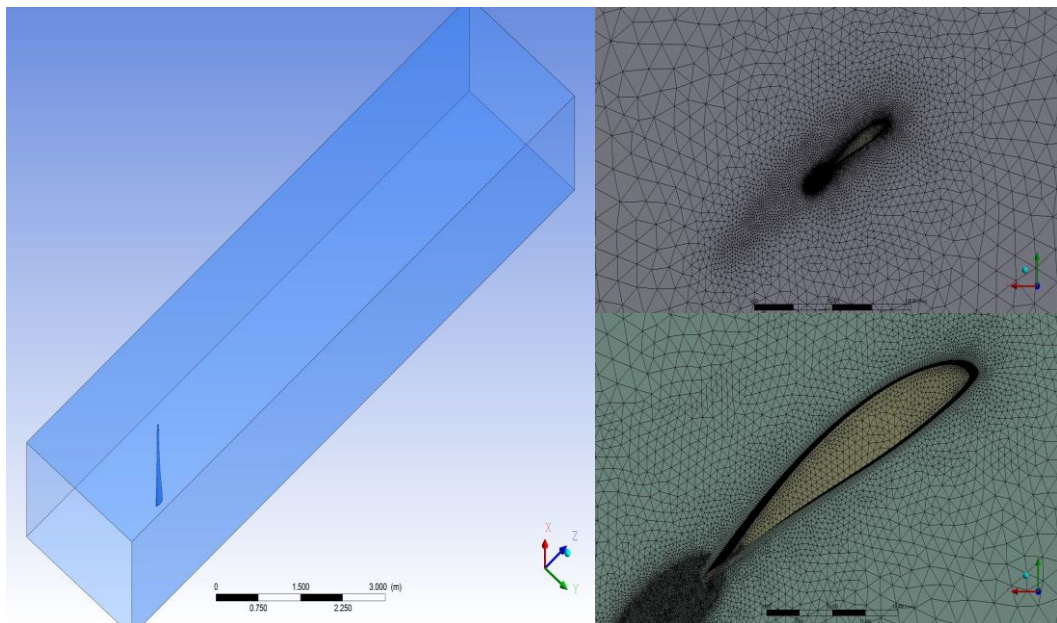
El dominio elegido para el desarrollo de este trabajo consiste en una sección del túnel de viento de capa límite de 10 m de longitud, con una sección transversal de 2,6 m de ancho por 1,85 de alto. Este dominio incluye la sección de prueba del túnel y dos tramos, aguas arriba y aguas abajo. Este último se extendió significativamente a los efectos de permitir una descarga del fluido minimizando las perturbaciones causadas por la pala. A la entrada se definió una velocidad constante de 9 m/s. La turbulencia en la entrada es del 3%, similar a la medida en el túnel de viento, con una escala espacial de 0.1 m. El número de Reynolds basado en la cuerda de la pala varía para cada sección, pero está en el orden de  $1e5$ .

Se empleó un esquema multibloque en el que el dominio se fue subdividiendo en una serie de bloques que permitiesen optimizar la cantidad y calidad de elementos, concentrándolos en aquellos sectores donde se precisa modelar las estructuras fluidodinámicas producto de la presencia de la pala.

La pala fue colocada en forma vertical, siguiendo la metodología a emplearse en la simulación física.

Para el mallado se empleó un esquema híbrido no conforme, con elementos tipo hexa, tetra y prisma.

Se dividió a la pala en estaciones de igual ancho y cada porción del fluido, siempre que fue posible, se malló usando la metodología “sweep”, que consiste en generar una malla “extrudada” en la sección. De esta forma se consiguen elementos de buena calidad y disminuye significativamente su número. La Figura 1 muestra el dominio y un detalle de la malla en el entorno de la pala.



**Figura 1.** Dominio de cómputo y detalle del mallado en una sección de la pala.

La cantidad de elementos varía desde los 5 hasta los 20 millones, según la posición que toma la pala respecto de la corriente incidente, y si tiene el flap Gurney o no. Este aumento se observa en los modelos que tienen el mini flap, ya que dadas las dimensiones del mismo, que van desde los 2 mm en la raíz hasta 1 mm en la punta, se generan estructuras fluidodinámicas de esta escala espacial, lo que inevitablemente produce una malla muy refinada en la zona del flap y su estela.

Se creó una capa límite alrededor de la pala, con los criterios de mallado acordes al modelo de turbulencia elegido para el análisis. En esta etapa, se realizó el cálculo con el programa Ansys Fluent, usando la metodología RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) con el modelo de dos ecuaciones  $k-\varepsilon$  “realizable” con función de pared “scalable”.

El caso se inicia usando el esquema “pseudo transient”, que permite obtener rápidamente una solución preliminar antes de pasar al análisis no estacionario. El paso de tiempo varía dependiendo del ángulo de incidencia de la pala y de si tiene instalado el flap Gurney, siendo el caso de posición de la pala a 0 grados con el miniflap Gurney colocado, el que precisa un paso temporal más pequeño (pero también, por otra parte, resulta ser uno de los modelos que menos elementos necesita).

Para la configuración general se emplearon condiciones de borde de velocidad a la entrada y presión a la salida. Para la discretización espacial se usaron esquemas de segundo orden, tipo “*upwind*” y para la temporal esquemas de segundo orden implícitos. El paso temporal fue fijado en  $1e-5$  s, definido en función de la frecuencia de desprendimientos periódicos de vórtices generados en el flap.

Los residuos en todos los casos se fijaron finalmente en el orden de  $1e-8$  y se verificó la independencia de la solución con el mallado a partir de sucesivos refinamientos en las regiones de interés. La convergencia de cada caso llevó aproximadamente 4 días de corrida con 16 núcleos Intel en paralelo.

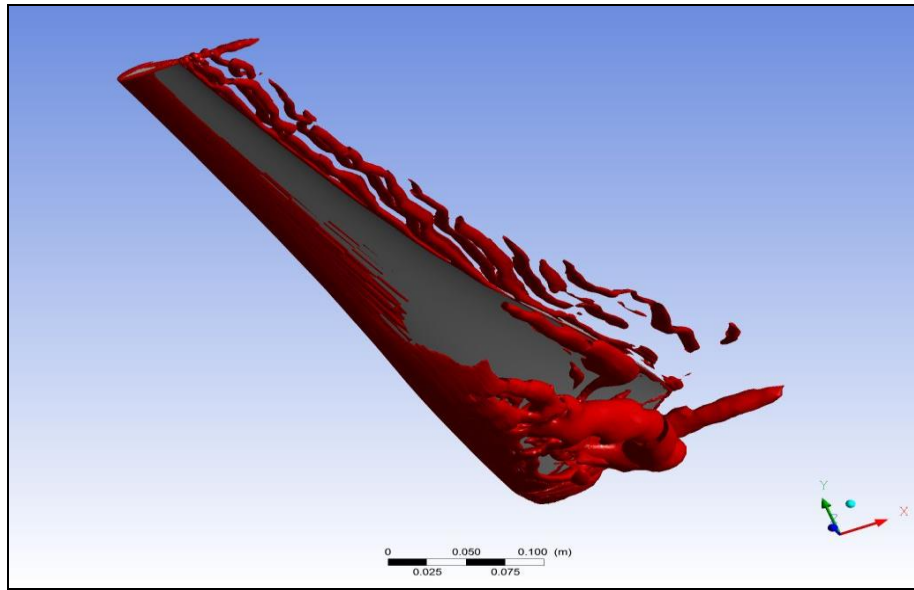
Los resultados de la simulación fueron comparados con mediciones de cargas aerodinámicas y presiones llevadas a cabo en el túnel de viento del Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (LaCLyFA) del Departamento Aeronáutica. Para los experimentos se construyó una pala de materiales compuestos equipada con tomas de presión, a la que se colocaba o quitaba el flap Gurney. Se utilizaron una balanza aerodinámica de dos componentes, desarrollada y construida en el LaCLyFA, y un multimanómetro marca Pressure Systems. La Figura 2 muestra la pala instalada en el túnel de viento para las mediciones. Los resultados de cargas totales se comparan con los calculados en forma numérica. Las distribuciones de presión experimentales, están aún siendo procesadas. Se realizaron los cálculos y mediciones para tres posiciones de la pala. Se tomó como referencia una sección a una distancia  $r$  del eje, con  $r/R = 0.6$  ( $R$  es el radio de la punta de pala), y se adoptaron ángulos de incidencia para esa sección de 0, 30 y 90 grados respectivamente.



**Figura 2:** Pala en el túnel de viento.

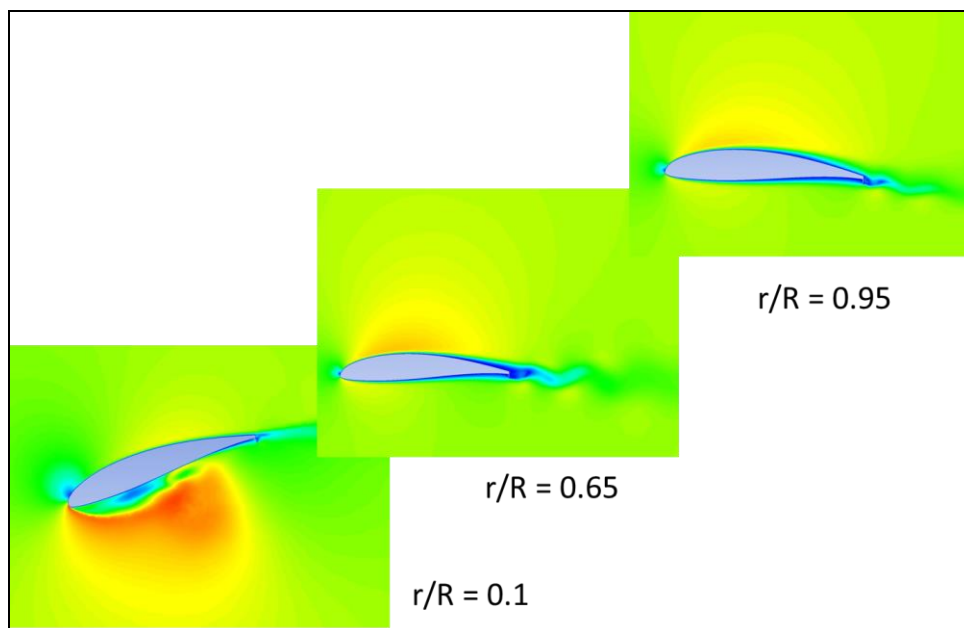
## RESULTADOS

Entre los cambios significativos que produce el flap Gurney en el flujo y contribuyen a las mejoras en eficiencia aerodinámica del perfil, están los desprendimientos asimétricos de vórtices de pequeña escala (comparable a la altura del flap). Era por lo tanto de importancia que la simulación numérica fuera capaz de capturar este efecto, lo que se logró, como se muestra en la Figura 3.

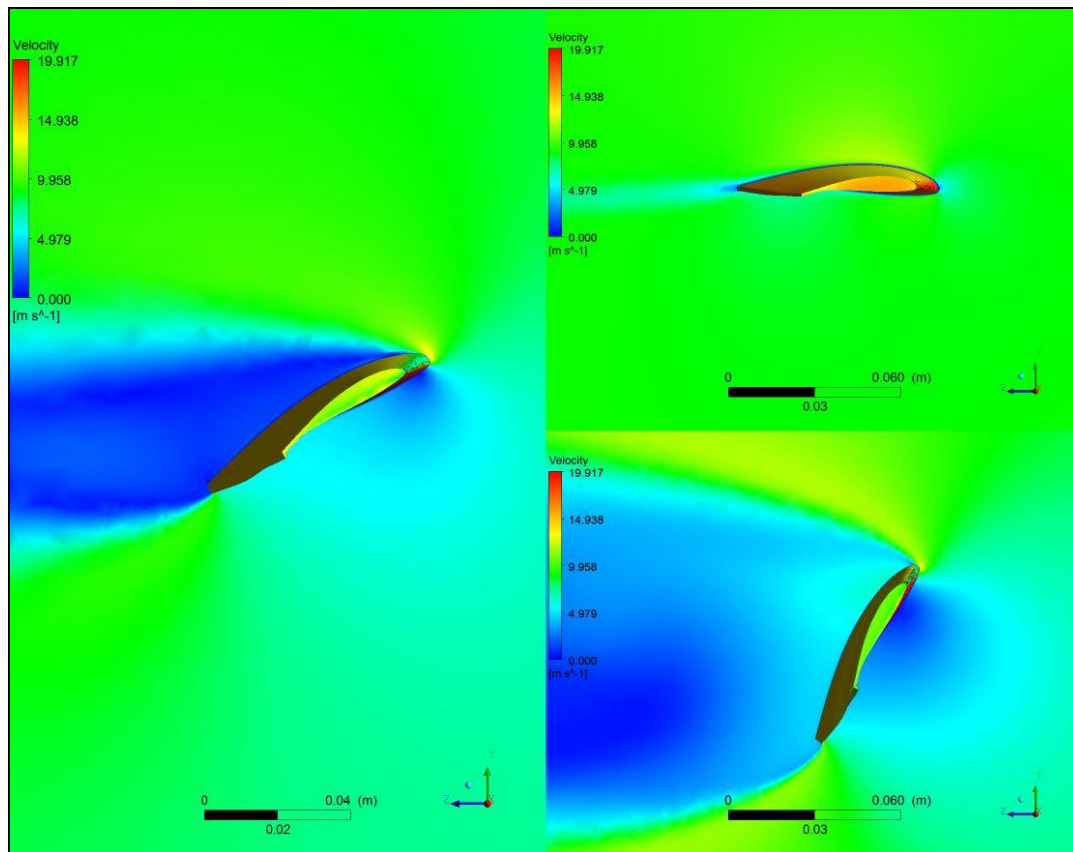


**Figura 3:** Pala a 0 grados con flap Gurney: isosuperficie de vorticidad, que muestra los desprendimientos vorticosos periódicos en el flap, así como los vórtices de punta y raíz de la pala.

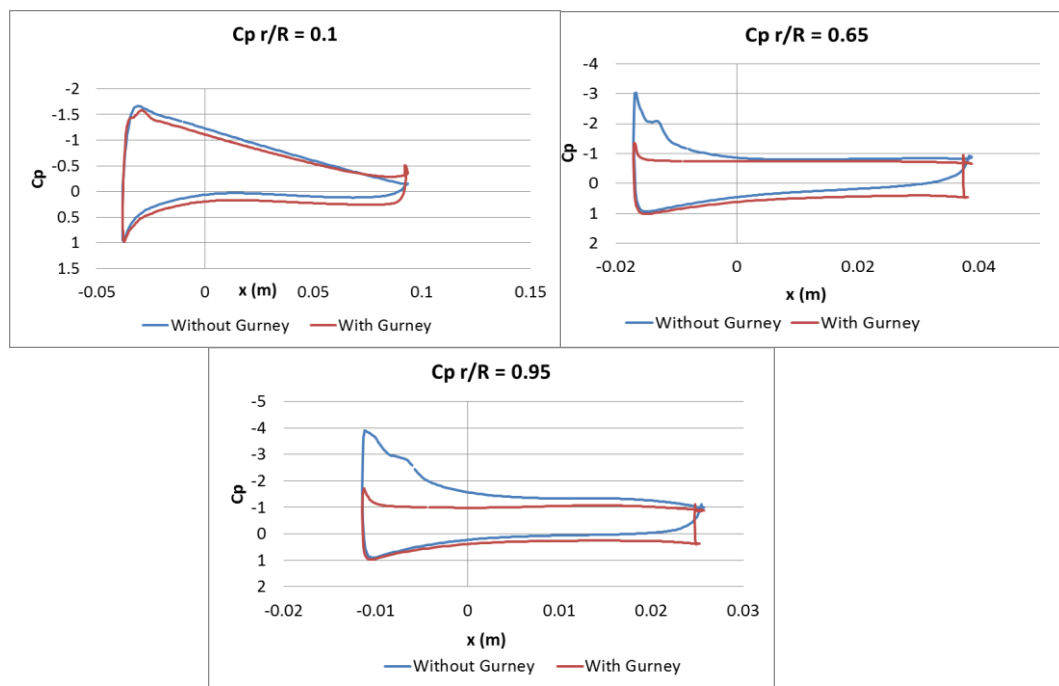
La torsión de la pala, definida en función de optimizar sus características aerodinámicas en operación, hace que cuando está fija, el ángulo de ataque sea variable sección a sección, con una torsión de 24 grados entre la raíz y la punta. La Figura 4 muestra la distribución de velocidad del flujo en planos horizontales en distintas secciones de la pala con flap Gurney, identificadas por su distancia  $r$  al eje de rotación, para el caso de la pala a 0 grados de incidencia. Se aprecia que para esa posición la raíz se encuentra con un ángulo de ataque negativo, debido a la torsión geométrica de la pala. La Figura 5 muestra las velocidades en la sección media de la pala, a  $r/R = 0.5$ .



**Figura 4:** Distribución normalizada de velocidad (rojo = máximo) para tres secciones de pala con flap Gurney a 0 grados. Las secciones no están a la misma escala geométrica.



**Figura 5.** Distribución de velocidad en la sección correspondiente a  $r/R = 0.5$ . Izquierda: 30 grados, con flap Gurney; derecha arriba: 0 grados, sin flap; derecha abajo: 90 grados, con flap. Los colores sobre la pala corresponden a la presión sobre la misma.



**Figura 6.** Distribución de coeficiente de presiones con la pala a 30 grados, en distintas secciones. El borde de ataque está a la izquierda ( $x$  negativo). Azul: sin flap, rojo: con flap.

La influencia del flap Gurney en la distribución de presiones sobre un perfil puede apreciarse, para el caso de la pala a 30 grados de incidencia, en la Figura 6. Se observa que el flap reduce el pico de succión cerca del borde de ataque en el extradós, pero incrementa la sobrepresión en el intradós, aumentando la sustentación total, incluso en esta condición de ángulos de ataque elevados y perfiles en pérdida.

**Tabla 1.** Coeficientes de sustentación y resistencia de la pala, para ángulos de 0, 30 y 90 grados con respecto al viento.

Sin flap				Con flap Gurney			
CFD		Experimental		CFD		Experimental	
Cd 0 grados	0.078	Cd 0 grados	0.09	Cd 0 grados	0.189	Cd 0 grados	0.21
Cl 0 grados	0.73	Cl 0 grados	0.767	Cl 0 grados	0.744	Cl 0 grados	0.77
Cd 30 grados	0.52	Cd 30 grados	0.557	Cd 30 grados	0.589	Cd 30 grados	0.607
Cl 30 grados	0.44	Cl 30 grados	0.48	Cl 30 grados	0.483	Cl 30 grados	0.51
Cd 90 grados	0.182	Cd 90 grados	0.204	Cd 90 grados	0.491	Cd 90 grados	0.522
Cl 90 grados	0.045	Cl 90 grados	0.069	Cl 90 grados	0.098	Cl 90 grados	0.117

La Tabla 1 sintetiza los coeficientes de sustentación  $C_L$  (lateral, en este caso) y resistencia,  $C_D$ , para toda la pala, definidos en función del área en planta de la misma, comparando los resultados numéricos y los experimentales. Los primeros tienden a predecir valores entre un 5 y un 10 % menores, excepto para la pala a 90 grados, para la que la diferencia en las cargas laterales es algo mayor. Consideramos que esta discrepancia (que consideramos aceptable para la validación del modelo numérico) puede atribuirse, al menos parcialmente, a imperfecciones de construcción de las palas físicas, pequeñas desviaciones entre estas y el CAD, impuestas por la metodología de construcción en laminado de fibra de vidrio y resina, en particular en los espesores de pegado del borde de fuga y el flap Gurney, incertidumbres en el perfil de velocidades que embiste la pala en el túnel (no se realizó un relevamiento del campo espacial de velocidades), y las limitaciones propias del modelo de turbulencia utilizado.

Se observa que el miniflap produce un aumento muy significativo de las cargas aerodinámicas en la condición más exigente de la pala (90 grados) y también un aumento de la resistencia en la posición más alineada con el viento (0 grados), mientras que para esta última condición la fuerza lateral no se modifica apreciablemente.

Para una posición de 30 grados, se obtiene un incremento del 10% según los resultados numéricos y 6% según los resultados experimentales, en la carga lateral (favorable para el arranque de la turbina). Si la turbina arranca desde la posición 90 grados, la fuerza lateral -que produce el torque inicial- se incrementa con el flap Gurney en un factor cercano a 2. Se concluye por lo tanto que, si bien el flap Gurney aumenta las cargas aerodinámicas totales en condición de rotor fijo, contribuye en forma positiva al arranque de la turbina.

## CONCLUSIONES

Se estudiaron en forma numérica y experimental el flujo y las cargas aerodinámicas en una pala de generador eólico de baja potencia, en escala real. Los resultados experimentales muestran una concordancia aceptable con los numéricos, validando así la metodología de cómputo utilizada.

Los valores de coeficientes de carga obtenidos en forma numérica fueron leve pero sistemáticamente inferiores a los determinados experimentalmente. La razón debe estudiarse en forma más exhaustiva.

Para la pala fija, la principal contribución del flap Gurney se obtiene en las posiciones de 30 y 90 grados, en las que la fuerza lateral, que produce el torque inicial, aumenta con la implementación de



este dispositivo, favoreciendo la condición de arranque de la turbina. Esto resulta particularmente beneficioso para los generadores eólicos de eje horizontal de paso fijo, en los que la incidencia óptima de las palas en condiciones de operación es de muy baja eficiencia para la situación de arranque. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que también aumenta la resistencia aerodinámica y con ello las cargas totales sobre la pala, lo que conlleva un requisito de mayor resistencia estructural.

La malla utilizada para el cálculo puede ser replicada para la turbina de tres palas, y la metodología empleada para el cálculo ha sido validada para este problema, de modo que es factible realizar la simulación de la turbina completa en distintas condiciones de operación para estudiar los efectos del flap Gurney en su performance. Esto constituye el trabajo futuro dentro de esta línea de investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el proyecto PICT 2008 – 226, “Aerodinámica de pequeñas turbinas eólicas para regiones de vientos moderados”, y el Proyecto Acreditado para Incentivos I184 UNLP “Aerodinámica de pequeños generadores eólicos”. Los autores agradecen la valiosa colaboración de los Sres. Víctor Padilla y Nehuén Savloff en las pruebas experimentales, y del Mag. Ing. Gastón Bonet en la construcción de la pala.

## REFERENCIAS

1. Bechert, D.W., Meyer, R., and Hage, W., Drag reduction of airfoils with miniflaps. Can we learn from dragonflies?, *AIAA Paper* **2315**, 2000.
2. Jang, C. S., Ross, J. C., and Cummings, R. M., Computational Evaluation of an Airfoil with a Gurney Flap, *AIAA Paper* **92-2708**, 1992.
3. Storms, B. L., and Jang, C. S., Lift enhancement of an airfoil using a Gurney flap and vortex generator, *Journal of Aircraft*, Vol. **31**, No. 3, pp. 542–547, 1994.
4. Colman, J., Marañón Di Leo J., Delnero J. S., Martinez M., Boldes, U., Bacchi F., Lift and drag coefficients behavior at low Reynolds number in an airfoil with miniflaps Gurney submitted to a turbulent flow. Part 1. *Latin American Applied Research*, Vol.**38** pp. 195-200, 2008.
5. Colman, J., Marañón Di Leo J., Delnero J. S., Martinez M., Boldes, U., Bacchi F.: Lift and drag coefficients behavior at low Reynolds number in an airfoil with miniflaps Gurney submitted to a turbulent flow. Part 2. *Latin American Applied Research*, Vol.**40**, pp. 75-80, 2010.
6. Wassen E., Guenther B., Thiele F., Delnero J. S., Marañón Di Leo J., Boldes, U. Colman, J., Bacchi F., Martinez M., Numerical and experimental investigation of miniflap positions on an airfoil. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2007.
7. Yee, K., Joo, W., Lee, D., Aerodynamic performance analysis of a Gurney flap for rotorcraft application, *Journal of Aircraft*, Vol. **44**, No. 3, pp 1003-1014, 2007.
8. Salcedo S., Monge F., Palacios F., Gandía F., Rodríguez A., Barcala M., Gurney flaps and trailing edge devices for wind turbines. *Proc. of EWECE 2006*, 2006.
9. Pellegrino, A., Meskell C., Vortex shedding from a wind turbine blade section at high angles of attack, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **121**, pp. 131–137, 2013.
10. Ferziger, Joel H., and Milovan Peric. "Computational methods for fluid dynamics, 1999.", Springer Ed.